

«УТВЕРЖДАЮ»

Директор НИЦ «Курчатовский институт» - ИВФЭ
доктор физико-математических наук, академик

 С.В. Иванов

« 28 » _____ 20 _____ г.



ОТЗЫВ

ведущей организации - Федерального государственного бюджетного учреждения «Институт физики высоких энергий» имени А.А. Логунова Национального исследовательского центра «Курчатовский институт»

на диссертацию **Салеева Артема Владимировича** «Новые аспекты спиновой динамики для прецизионных экспериментов по поиску электрического дипольного момента заряженных частиц на накопительных кольцах», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.16 – физика атомного ядра и элементарных частиц.

Как известно, в видимой части Вселенной наблюдается преобладание барионов над антибарионами. Одним из условий генерации барионной асимметрии в ходе эволюции Вселенной является нарушение CP-инвариантности, поскольку ее сохранение будет приводить к рождению одинакового числа барионов и антибарионов. В поисках решения проблемы барионной асимметрии Вселенной исследуются процессы, в которых может нарушаться CP-инвариантность. Впервые её нарушение было открыто в 1964 году в распадах нейтральных K-мезонов, а затем и в распадах B-мезонов. Одним из направлений таких исследований является поиск и измерение электрических дипольных моментов (ЭДМ) нуклонов. Для нейтрона установлен верхний предел на ЭДМ на уровне 3.0×10^{-26} е-см, а для заряженных протонов прямых измерений пока нет. В рамках Стандартной модели ожидаемая величина ЭДМ нейтрона находится в диапазоне от 10^{-31} до 10^{-33} е-см, что недостаточно для объяснения барионной асимметрии Вселенной. Поэтому обнаружение значительной величины ЭДМ нуклона было бы большим шагом в построении модели образования Вселенной.

Диссертационная работа Артема Владимировича Салеева посвящена исследованию спиновой динамики для прецизионных экспериментов по поиску электрического дипольного момента заряженных частиц на накопительных кольцах, в том числе для протонов, дейтронов и ядер гелия-3. Основной идеей поиска ЭДМ протонов и дейтронов является наблюдение дополнительной прецессии спина этих частиц в электрических и магнитных полях кольца ускорителя-накопителя. Поскольку углы прецессии спина, связанные с ЭДМ, очень малы по сравнению с углами прецессии спина, вызванными магнитным дипольным моментом частицы (МДМ), то необходимо очень точно контролировать спиновую динамику в накопителе. Именно такая работа была проделана А.В. Салеевым в рамках подготовки эксперимента JEDI (Юлих, Германия) на накопителе COSY. Им были разработаны методы учета отличия магнитных полей накопителя от

идеальных полей, что необходимо для минимизации ошибок измерений ЭДМ. Методы определения с высокой точностью оси стабильного направления спина в накопителе и её регулирования с помощью ротаторов спина позволяют контролировать погрешности в измерении верхнего порога на величину ЭДМ. Поскольку измерение ЭДМ заряженных частиц невозможно без решения указанных выше задач, тема диссертационной работы А.В. Салеева является, несомненно, **актуальной**.

Оформление диссертационной работы:

Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения, приложения и списка литературы. Объем диссертации составляет 134 страницы, содержит 34 рисунка и 10 таблиц. Список литературы включает 65 наименований. Материалы диссертации изложены в 7 печатных изданиях, из них 6 работ входят в международные базы цитирования Scopus и Web of Science. В журналах, рекомендованных ВАК, опубликованы 4 работы, а в тезисах докладов – три.

Во **Введении** обосновывается актуальность выбранной темы, формулируются цели и задачи диссертационной работы, описывается её научная новизна и научно-практическая ценность, сделан обзор научной литературы по изучаемой тематике.

В **первой главе** изложена суть резонансного метода для поиска ЭДМ на накопителе COSY. Ожидаемая точность метода для ЭДМ дейтрона 10^{-24} е·см. Для достижения указанной точности был разработан метод контроля относительной фазы между радиочастотным полем спинового ротатора и углом прецессии спина частицы в горизонтальной плоскости с точностью 0.21 радиан. Эксперимент JEDI впервые показал возможность удержания точного спинового резонанса в течение времени порядка 100 секунд, что необходимо для накопления очень малого сигнала ЭДМ.

Во **второй главе** обсуждается явление ухода от условий радиочастотного спинового резонанса для частиц, движущихся по траекториям, отклоняющимся от центральной траектории. Аналитические расчеты впервые показали, что затухание радиочастотных осцилляций спина в вертикальном направлении происходит степенным образом, а не экспоненциальным.

В **третьей главе** рассматривается фон к сигналу ЭДМ, возникающий из-за взаимодействия МДМ с паразитными магнитными полями кольца накопителя. Для решения этой проблемы был предложен метод контроля фона от МДМ в сигнал ЭДМ, на основе измерения рельефа частоты прецессии спина, при спиновом отклике кольца на статические спиновые ротаторы.

В **четвертой главе** обсуждается исследование неидеальных магнитных полей в накопителе COSY – паразитных магнитных полей в плоскости кольца накопителя. Рассмотрено первое экспериментальное приложение метода измерения рельефа частоты прецессии спина к измерению наклона оси стабильного спина в ускорителе COSY.

В **пятой главе** приведены численные оценки систематических эффектов, которые возникают в результате искажения замкнутой орбиты частицы соленидами при измерении рельефа частоты прецессии спина в накопителе COSY. Из сравнения данных

эксперимента с результатами численного моделирования сделаны рекомендации по улучшению техники измерения рельефа спиновой частоты.

В **Заключении** диссертации изложены основные результаты диссертационной работы, среди которых необходимо отметить следующие:

1) Разработан метод измерения направления оси стабильного спина, с точностью до 2.8 мкрад, на основе модуляции «спинтьюна» статическими соленоидами. Метод был применен для определения влияния интегрального эффекта неидеальных магнитных полей накопителя COSY на наклон оси стабильного спина. В задаче поиска ЭДМ дейтрона метод позволяет получить статистическую точность измерения сигнала ЭДМ порядка 10^{-20} е.см, при энергии пучка $T=270$ МэВ.

2) Проведено численное моделирование орбитальной и спиновой динамики для равновесной орбиты частицы при возникновении сдвигов орбиты из-за неточности позиционирования статического соленоида относительно пучка в методе измерения направления оси стабильного спина и проведено сравнение с экспериментальными данными. Выявлена необходимость более детального описания динамики спина в соленоидах и получены оценки влияния сдвигов орбиты на изменение динамики спина в кольце.

3) Разработана теория затухания осцилляций вертикальной поляризации в резонансном радиочастотном режиме с применением фильтра Вина. Предложенный метод позволяет найти энергии пучка и гармоники радиочастотного поля фильтра Вина, при которых может быть значительно снижена декогерентность поляризации. Декогерентность поляризации возникает за счёт синхротронных колебаний частиц, происходящих во время накопления сигнала ЭДМ. Предсказан уход фазы осцилляций, что позволит снизить систематическую неопределенность в измерении сигнала ЭДМ.

4) Разработан метод контроля относительной фазы, между сигналом радиочастотного поля ротатора спина и углом прецессии спина в накопительном кольце, с точностью 0.21 радиан, который позволяет соблюдать условие точного спинового резонанса, что необходимо для накопления сигнала ЭДМ. Указанный метод позволит также получить зависимость скорости роста вертикальной поляризации частицы от относительной фазы. Он будет задействован при поиске ЭДМ дейтрона с РЧ фильтром Вина и, в перспективе, при поиске ЭДМ в электростатическом кольце.

Достоверность полученных в диссертационной работе результатов обеспечивается тем, что при анализе систематических эффектов был использован программный комплекс, разработанный для моделирования спин-орбитальной динамики «COSY Infinity». Полученные на основе спинового формализма, зависимости модуляции частоты прецессии спина от величин искусственного неидеального поля полностью совпадают с результатами численного моделирования динамики спина в «COSY Infinity», а также согласуются с измерениями в эксперименте, с достаточно высокой степенью точности. Достоверность результатов подтверждается также их презентацией и экспертной оценкой на многочисленных международных конференциях и семинарах.

Научная новизна

Основная работа была посвящена развитию теоретического аппарата для моделирования спиновой динамики и динамики пучка для определения фоновых к ЭДМ сигналов,

возникающих из-за взаимодействия магнитного дипольного момента заряженных частиц с неидеальными магнитными полями накопительного кольца. Впервые развит подход, основанный на модуляции частоты прецессии горизонтальной компоненты спина, которая может быть измерена с относительной точностью порядка 10^{-10} . В качестве анализирующих элементов использованы имеющиеся на ускорителе COSY соленоиды, входящие в две системы электронного охлаждения пучка. На основе проведенного анализа экспериментальных данных коллаборации JEDI, полученных на ускорителе COSY в Юлихе, Германия, показано, что эта техника позволит контролировать угловую ориентацию оси стабильного спина с точностью до 2.8 мкрад. Автором дана оценка ложных эффектов, вызванных неточной ориентацией магнитных осей соленоидов. Кроме того, на основе разработанной автором методики был проведен эксперимент по стабилизации относительной фазы спина и радиочастотного поля с точностью до 0.21 рад, что достаточно для проведения запланированных измерений ЭДМ. Впервые получена форма зависимости скорости затухания осцилляций вертикальной компоненты поляризации от синхротронных амплитуд в процессе спинового резонанса, отличная от экспоненциальной, и предсказан уход фазы осцилляций.

Научно-практическая значимость

Разработанные автором методы измерения направления оси стабильного спина позволяют получить статистическую точность измерения сигнала ЭДМ порядка 10^{-20} е-см. Ожидается, что указанный метод будет иметь широкое применение при калибровке различных устройств, задействованных для поиска ЭДМ в магнитных и гибридных магнитно-электрических накопительных кольцах. Выявлена необходимость более детального описания динамики спина в соленоидах и получены оценки влияния сдвигов орбиты на изменение динамики спина в кольце. Предложенный автором метод позволяет найти энергии пучка и гармоники радиочастотного поля фильтра Вина, при которых может быть значительно снижена декогерентность поляризации. Предсказан уход фазы осцилляций, что позволит снизить систематическую неопределенность в измерении сигнала ЭДМ. Разработанный метод контроля относительной фазы, между сигналом радиочастотного поля ротатора спина и углом прецессии спина в накопительном кольце позволяет соблюдать условие точного спинового резонанса, что необходимо для накопления сигнала ЭДМ. Он будет задействован при поиске ЭДМ дейтрона с РЧ фильтром Вина, и, возможно, при поиске ЭДМ в электростатическом кольце. Программа поиска ЭДМ является основной для Института ядерной физики в Юлихе, Германия. Эксперимент планируется провести в 2018 г., в последующую пятилетку планируется реконструкция COSY с изучением систематических эффектов на новом уровне чувствительности, с возможным улучшением верхнего предела на ЭДМ до 10^{-24} е-см, и подготовкой проекта специализированного кольца для поиска ЭДМ к 2022-2023 годам.

По представленной диссертации можно сделать ряд **замечаний**:

- 1) Ссылки на работы, опубликованные первоначально на русском языке, даются на их англоязычные переводы, либо на русские издания, но написанные в английской транскрипции. В этих случаях правильнее было бы ссылаться на оригиналы статей на русском языке. Это касается многих ссылок в диссертации. Например, в случае ссылки [1] следовало указать: Далитц Р Г "Кандидатская диссертация Андрея Сахарова" УФН 161 (5) 121–136 (1991). Автор данной статьи в УФН - Далитц Р. Г., а не Сахаров А.Д., хотя она посвящена ранней работе А.Д. Сахарова.

2) Все ссылки представляют собой смесь английских и русских слов. Издание, как правило, указано на английском языке, но дата, номер тома и стр. – на русском. Это небрежность автора.

3) На стр. 9. В предложении: "На практике, горизонтальное время когерентности спинов слишком мало, чтобы наблюдать полные периоды осцилляций вертикальной поляризации за счёт ЭДМ, и можно будет увидеть только начальный этап медленного роста вертикальной поляризации". Используется неудачный термин "горизонтальное время".

4) На стр. 23. В первой строке используется термин «ИН», расшифровка которого появляется только в третьей главе. Следует определять новые термины по мере их появления в тексте.

5) На стр. 31. В предложении «Дейтроны, которые рассеялись эластично, были зафиксированы датчиками сцинтилляторов ...» применен термин «эластично». Корректный термин в данном случае – «упруго».

6) На стр. 79. В фразе «..чтобы понять причину огромности ..» слово «огромность» явно неуместно в тексте диссертации.

7) На стр. 81. В предложении «В таком случае, магнитное поле соленоида приобретает вертикальные и горизонтальные компоненты поля, которые пропорциональны интегральному полю в соленоиде χA_I и углам поворота $\xi_{x,y}$ соленоида вокруг осей x и y соответственно» упомянут соленоид χA_I , но этим символом ранее обозначался соответствующий угол поворота спина.

Сделанные замечания не влияют на положительную в целом и высокую оценку диссертационной работы. Основные результаты и выводы работы представляются достоверными, полезными, значимыми и опубликованы в реферируемых журналах.

Автореферат диссертации соответствует содержанию диссертации. Диссертационная работа А.В. Салеева была доложена и обсуждена на научном семинаре НИЦ «Курчатовский институт» - ИФВЭ 28 декабря 2017 г.

Заключение

Таким образом, диссертационная работа Салеева А.В. «Новые аспекты спиновой динамики для прецизионных экспериментов по поиску электрического дипольного момента заряженных частиц на накопительных кольцах» является завершенной научно-квалификационной работой, в которой решены научные задачи определения с высокой точностью оси стабильного направления спина в накопителе и минимизации погрешностей в измерениях ЭДМ заряженных частиц, что важно для поиска и исследования механизма нарушения СР-инвариантности и для практической подготовки эксперимента JEDI на накопителе COSY. Диссертационная работа соответствует всем требованиям, предъявляемым ВАК РФ к кандидатским диссертациям, установленным «Положением о порядке присуждения ученых степеней», утвержденным постановлением Правительства РФ от 24 сентября 2013 № 842 с изменениями от 21 апреля 2016 (приказ № 335), а её автор, **Салеев Артем Владимирович**, несомненно заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.16 – «физика атомного ядра и элементарных частиц».

Отзыв составил ведущий научный сотрудник
Отделения экспериментальной физики
НИЦ «Курчатовский институт» - ИФВЭ,
доктор физико-математических наук
Тел.: (4967)71-37-65, Эл. почта: Victor.Abramov@ihep.ru

В.В. Абрамов

Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт» Федеральное
государственное бюджетное учреждение «Институт физики высоких энергий» имени
А.А. Логунова Национального исследовательского центра «Курчатовский институт»
(НИЦ «Курчатовский институт» - ИФВЭ)

Почтовый адрес:

142281, Московская обл., г. Протвино, площадь Науки, дом 1,
Тел.: (4967)71-36-23, Факс:(4967)74-28-24, E-mail: fgbu@ihep.ru,
Официальный сайт: <http://www.ihep.ru>

Подпись В.В. Абрамова заверяю,
Ученый секретарь
НИЦ «Курчатовский институт» - ИФВЭ



Н.Н. Прокопенко